انجمن آهن و فولاد ایران

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



استحکام بخشی شیشه‌های سودالایم با استفاده از روش تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی*

مقاله پژوهشی

امید بناپور غفاری[۱]   امیررضا فدائی[۲]   پوریا لطفی پور[۳]   بیژن افتخاری یکتا[۴]

DOI: 10.22067/jmme.2024.84990.1127

چکیده *تعویض یونی یکی از روش‌های استحکام بخشی شیشه‌ها می‌باشد که شامل وارد کردن شیشه حاوی محتوای قلیایی در یک حمام نمک مذاب (به عنوان مثال نیترات پتاسیم) می‌باشد. در این فرآیند یون کوچک‌تر از ساختار شیشه خارج شده و یون بزرگ‌تر وارد ساختار شیشه می‌شود. این فرآیند باعث ایجاد تنش فشاری در سطح می شود و در نتیجه استحکام را افزایش می‌دهد. با اعمال یک انرژی خارجی مانند میدان الکتریکی، می‌توان سرعت و راندمان فرآیند را افزایش داد. در تحقیق حاضر با استفاده از روش تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، به بررسی استحکام بخشی شیشه‌های سودالایم پرداخته شده است. در این پژوهش پارامترهای دما، زمان و میدان الکتریکی به هدف افزایش استحکام بررسی شدند. بیشترین استحکام، عدد سختی و بهترین شکست نگاری در نمونه‌ای مشاهده شد که تنها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در میدانی به شدت ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر قرار گرفت. مشاهده شد که استحکام نمونه‌ها به بیش از ۴ برابر نسبت به نمونه خام رسید. همچنین عدد سختی نمونه‌ها نیز از ۵۵۰±۵۰ kg_f/mm^2 به ۷۵۰±۵۰ kg_f/mm^2 افزایش پیدا کرد. علاوه بر این عمق نفوذ برای نمونه‌ای که تنها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت میدانی به شدت ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر بوده است، به ۱۱ میکرومتر رسیده است. قابل ذکر است برای نمونه‌هایی که تحت فرآیند تمپر شیمیایی بدون استفاده از میدان الکتریکی قرار گرفته‌اند، در شرایط دمایی ۴۰۰درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴۰ دقیقه عمق نفوذ ۳ میکرومتر شد.*

واژه های کلیدی تمپر شیمیایی، تعویض یونی، خواص مکانیکی، تنش فشاری، عمق نفوذ.

Strengthening of Soda-Lime-Silicate Glasses Using Field-assisted Ion Exchange Method

Omid Banapour Ghaffari   Amirreza Fadaei   Pourya lotfipour   Bijan Eftekhari Yekta

Abstract The strength of glasses increases during an ion exchange experiment because of the significant surface compression that arises from the replacement of larger alkali ions into the smaller host alkali ion site. The application of an external energy source, such as an electric field, has the potential to enhance the efficiency of the ion exchange process. This study examines the enhancement of the mechanical strength of soda-lime glasses through the utilization of the electric field-assisted ion exchange technique. The objective of this study was to examine the effects of temperature, time, and electric field on enhancing the strength of the raw glasses. The sample exhibits the greatest strength and highest hardness number when subjected to a temperature of 400 °C and an electric field intensity of 2000 V/cm for a duration of 10 minutes. The results indicate that the samples exhibited a strength that exceeded four times the initial strength of the raw sample. Additionally, there was an observed increase in the hardness of the samples, with values ranging from 550±50 kg_f/mm^2 to 750±50 kg_f/mm^2. Furthermore, it has been observed that the case depth has attained a magnitude of 11 µm in specimens subjected to an electric field strength of 2000 V/cm for a mere duration of 10 minutes while being maintained at a temperature of 400 °C. Notably, in the absence of an electric field, the chemically tempered samples exhibit a depth of 3 micrometers at temperature settings of 400 °C for a duration of 240 minutes.

Key Words: Strengthening of glass, Electric field-assisted ion exchange, Mechanical properties, Calculation of compressive stress.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۷/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۴) نویسندهٔ مسئول، استاد دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: beftekhari@iust.ac.i

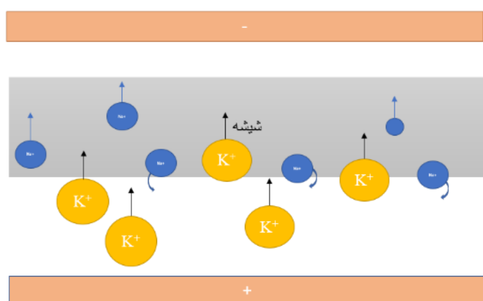
مقدمه

شیشه به دلیل خواص منحصر به فردش یک نقش اساسی در کاربردهای روزمره داشته است. خواص مکانیکی شیشه غالبا از توزیع و عمق عیوب سطحی تاثیر می‌پذیرد و حضور ریزترک‌های سطحی موجب افت خواص مکانیکی شیشه می‌شوند. تحقیقات گسترده‌ای جهت تقویت خواص مکانیکی شیشه بوسیله اعمال تنش فشاری صورت پذیرفته است. به عبارت دیگر، تنش فشاری، ایجاد و انتشار ترک‌ها را محدود می‌سازد [1-4].

روش‌های متداول استحکام بخشی شیشه‌ها شامل تمپر حرارتی و تمپر شیمیایی است. در روش تمپر حرارتی شیشه‌ها با استفاده از اعمال شیب حرارتی، تنش فشاری ماندگاری ایجاد می‌شود که از رشد ترک جلوگیری شود. اما این روش برای استحکام بخشی شیشه‌های با ضخامت کمتر از ۲–۳ میلی‌متر و همچنین شیشه‌هایی با هندسه پیچیده مناسب نمی‌باشد [1-3]. روش دیگر افزایش استحکام در شیشه‌ها، تمپر شیمیایی یا استحکام بخشی شیمیایی می‌باشد. این روش از دو طریق قابل دستیابی می‌باشد. ۱. تعویض کاتیون‌های بزرگتر با کاتیون‌های کوچکتر ۲. روش دوم ایجاد تنش فشاری از طریق کاهش ضریب انبساط سطحی لایه سطحی می‌باشد که از طرق متفاوت به مانند جایگزین کردن یون‌های کوچک‌تر مثل +Li به جای یون‌های بزرگتر در سطح انجام می‌پذیرد [1-3]. تعویض یونی در شیشه‌ها، یکی از فرآیندهایی است که پس از شکل‌دهی انجام شده و امروزه در بسیاری از کارخانجات به منظور استحکام بخشی شیشه‌های مختلف، از فرآیند تعویض یونی استفاده می‌شود. همچنین از این فرآیند به منظور تغییر ضریب شکست در یک ناحیه مشخص (در موجبرها (Waveguides)) [5-12] و کاربرهای آنتی باکتریال [13-17] به طور گسترده استفاده می‌شود.

دلیل افزایش استحکام، ایجاد تنش فشاری بوسیله فرآیند تعویض یونی می‌باشد. خواص تعویض یونی شیشه و استحکام ایجاد شده، بوسیله بزرگی تنش فشاری (Compressive stress (CS)) و عمق لایه تعویض یونی شده ((Depth of layer (DOL)) بررسی می‌شود [1,3]. باید توجه کرد که خواص مذکور به شدت به ترکیب شیشه تحت فرآیند و تاریخچه حرارتی (Thermal history) آن وابسته می‌باشد [18,19]. قابل ذکر است که فرآیند تمپر شیمیایی (تعویض یونی) به دلیل ماهیت نفوذی‌ای که دارد، باید در دمای بالا (دمایی مابین دمای نقطه ذوب نمک و دمای انتقال به شیشه) انجام شود. در دمای بالا احتمال غلبه بر سد انرژی جهت جهش یون‌ها (Ion Hopping) در ماتریس شیشه‌ای فراهم است [20]. همچنین فرآیند مذکور می‌تواند به کمک اعمال میدان الکتریکی تسریع شود در حالی که درصورتی که فرآیند بوسیله انرژی خارجی تسریع نشود، بسته به میزان عمق نفوذ مورد نیاز ساعت‌ها زمان می‌برد [18,21-25]. استفاده از میدان الکتریکی، مکانیسم حاکم بر نفوذ را تغیر می‌دهد و از حالت نفوذ با نیروی پیشران شیب غلظتی به نفوذ با نیروی پیشران میدان الکتریکی تبدیل می‌کند. در روش تمپر شیمیایی یون‌های مورد نظر (به عنوان مثال پتاسیم) جایگزین یون‌های سدیم در ساختار شیشه شده و سدیم وارد مذاب می‌شود (حرکت خلاف جهت یون میزبان و یون مهمان). اما در فرآیند تمپر شیمیایی به همراه میدان الکتریکی، هر دو یون برخلاف حالت بدون میدان در یک جهت حرکت می‌کنند که این امر به دلیل اختلاف پتانسیل می‌باشد.

با توجه به شکل ۱) مشاهده می‌شود که در اثنای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، برخی سدیم های موجود در لایه سطحی ساختار شیشه به مذاب منتقل شده و برخی نیز به سمت قطب منفی حرکت می‌کنند. همچنین یون‌های پتاسیم موجود در مذاب، به سمت ساختار شیشه (به سمت قطب منفی) حرکت می‌کنند و جانشین یون‌های سدیم می‌شوند [26,27].



شکل ۱ شماتیک فرآیند تعویض یونی به همراه میدان الکتریکی و نحوه حرکت یون‌ها

در روش تمپر شیمیایی در انتخاب شیشه محدودیت وجود دارد و شیشه مورد استفاده در تمپر شیمیایی سیلیکات قلیایی می‌باشد. علاوه بر این در انتخاب شیشه مورد استفاده باید توجه کرد که بستر شیشه‌ای ایده‌آل باید درصد قلیایی بالا، دوام و

پایداری شیمیایی بالا در محلول های آبی و نمک مذاب و همچنین درصد ناخالصی پایین داشته باشد. بنابراین همانطور که گفته شد بدلیل طبیعت نفوذی تمپر شیمیایی، زمان انجام فرآیند بسیار طولانی می‌باشد و نیازمند زمان طولانی است [25,28-30].

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان از شیشه‌های سودالایم استفاده شد. این نوع شیشه‌ها کاربرد صنعتی گسترده‌ای دارند و به علت فرآوانی و برخورداری از عنصر قلیایی به میزان بالا گزینه مناسبی جهت تعویض یونی هستند. به همین منظور از شیشه‌های شرکت کورنینگ (Corning®) با کد ۲۹۴۷ بهره گرفته شد. ترکیب شیمیایی این شیشه‌ها در جدول ۱) ارائه شده‌است. برای انجام فرآیند از نمک نیترات پتاسیم (شرکت نترون (Neutron) با کد ۱-۷۹-۷۷۵۷ با خلوص ۹۹/۵) استفاده شد.

در این پژوهش از نمونه‌های شیشه‌ای سودالایم مستطیل شکل به ضخامت ۱ میلی متر و طول و عرض به ترتیب ۳۵ و ۷۵ میلی‌متر مربع استفاده شد، در ابتدای هر آزمایش نمونه‌های شیشه با آب دی‌یونیزه و پاشش اتانول، تمیز شدند. برای ایجاد جریان و رسانایی در زیر لایه شیشه‌ای، یک سوی زیر لایه شیشه‌ای به وسیله سیم مسی و چسب آلومینیومی به شکل مستطیل پوشش داده شد و در سوی دیگر، درون ستون‌های ذخیره مذاب، الکترودی از جنس آلیاژ نیکل-کروم قرار داده شد. شکل) طرح واره دستگاه مورد استفاده جهت تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۲) شیشه برروی محفظه نگهداری نمک جایگذاری شد و محفظه نگهداری نمک به همراه شیشه درون محفظه حرارتی به منظور ذوب نمک قرار گرفت. بعد از رسیدن به دمای مد نظر، میدان‌های الکتریکی اعمال شد تا تاثیر اعمال میدان بر فرآیند تعویض یونی بررسی شود. در این پژوهش استحکام خمشی سه نقطه‌ای، سختی و پروفایل غلظتی نمک پتاسیم در میدان‌هایی به شدت $400\frac{v}{cm}$، $1000\frac{v}{cm}$، $2000\frac{v}{cm}$ و در بازه‌ی دمای ۳۷۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد و همچنین در زمان های ۱، ۵، ۱۰، ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه مورد مقایسه قرار گرفت. جدول (۲) شرایط آزمایش و نحوی کدگذاری نمونه‌های تعویض یونی شده را نشان می‌دهد.

در اثنای فرآیند تعویض یونی جریان و ولتاژ کنترل می‌شد. پس از اتمام فرآیند شیشه‌ها از محفظه خارج و در مرحله‌ی آخر پس از برداشته شدن چسب آلومینیومی، بوسیله شستشو شیشه با آب دی‌یونیزه و پاشش اتانول بر شیشه‌ها، پاکسازی شیشه‌ها انجام شد تا برای انجام آزمون‌های میکرو سختی، استحکام سنجی سه نقطه‌ای و اندازه‌گیری پروفایل غلظتی آماده شود.

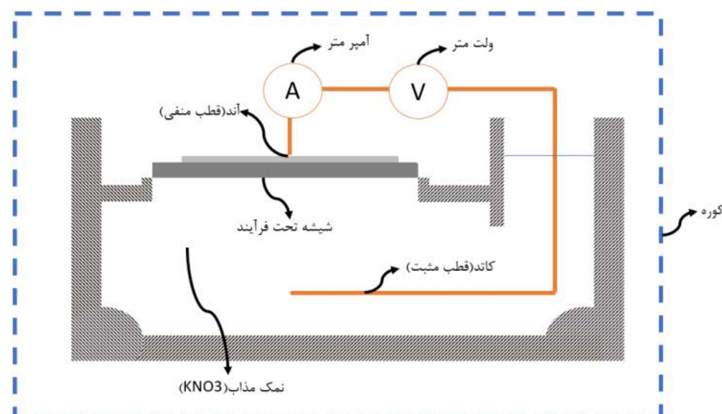
برای بررسی سختی نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند تعویض یونی از میکرو سختی ویکرز با استاندار ASTME384-84 استفاده شد. آزمون سختی‌سنجی در این پژوهش با اعمال نیروهای kgf ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱، زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه، تحت اتمسفر هوا، رطوب هوا ۳۰-۵۰ درصد و در دمای محیط انجام شد. عدد سختی توسط رابطه زیر محاسبه شد. در این رابطه F نیرو فرورفتگی بر حسب کیلوگرم است و D میانگین طول قطرهای فرورفتگی‌ها است [31].

$$\text{VHN} = 1.8544\frac{\text{F}}{\text{D}^2}$$

برای اندازه گیری پروفایل غلظتی سطح مقطع نمونه‌ها از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN VEGA/XMU) مجهز به طیف سنج پرتو ایکس پراکنده ساز انرژی (TESCAN EssenceTM) استفاده شد. قابل ذکر است اندازه‌گیری پروفایل‌ها به صورت آنالیز خطی و توزیع عناصر انجام شد. پروفایل‌ها از سطح تا عمق ۵۰ میکرومتر در نمونه‌ها و از ۲۵۶ نقطه با فاصله زمانی ۱ ثانیه نمونه برداری شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی شیشه سودالایم زیرلایه (کورنینگ ۲۹۴۷)

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	trace
درصد وزنی(wt%)	۷۰/۵۶	۱۴/۵۴	۸/۹۳	۳/۴۱	۰/۵۹	۰/۸۷	۱/۱



شکل ۲ طرح واره دستگاه مورد استفاده جهت انجام فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی

جدول ۲ شرایط آماده سازی نمونه¬ها و نحوی کدگذاری آنها

کد نمونه	دما انجام فرآیند تعویض یونی(°C)	زمان انجام فرآیند تعویض یونی(min)	میدان اعمالی حین فرآیند تعویض یونی($\frac{V}{cm}$)
۴۰۰-۱-۲۰۰۰	۴۰۰	۱	۲۰۰۰
۴۰۰-۵-۲۰۰۰	۴۰۰	۵	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۶۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۶۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۲۴۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۲۴۰	۲۰۰۰
۳۷۰-۱۰-۲۰۰۰	۳۷۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۳۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۳۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۴۰۰	۴۰۰	۱۰	۴۰۰
۴۰۰-۱۰-۱۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۱۰۰۰

همانطور که گفته شد، با انجام فرآیند تعویض یونی، یونی با شعاع یونی بزرگتر جانشین یونی با شعاع یونی کوچک‌تر شده و به دلیل ایجاد اختلاف شعاع یونی، تنش پسماند فشاری در سطح شیشه ایجاد می‌شود. به طور کلی، علت ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح به عدم تطابق شعاع یونی مابین سدیم و پتاسیم باز می‌گردد. در نتیجه اختلاف شعاع یونی(عدم تطابق)، تنش فشاری از لایه درونی به لایه سطحی اعمال می‌شود. وجود تنش پسماند فشاری در لایه سطحی، علت افزایش استحکام شیشه تعویض یونی شده نسبت به شیشه خام است. همچنین تنش پسماند فشاری در لایه سطحی موجب افزایش سختی در شیشه تعویض یونی شده می‌شود به همین جهت اندازه‌گیری تنش پسماند فشاری در لایه سطحی شیشه حائز اهمیت است. طبق پژوهش لاون [32]، یک راه نسبتا آسان در اندازه گیری تنش پسماند در مواد ترد، ایجاد ترک‌های ناشی از فرورفتگی می‌باشد. لاون [32] رابطه زیر را برای اندازه‌گیری تنش پسماند فشاری ارائه کرد. در این رابطه، P برابر با بار اعمالی حداکثری، d برابر با ضخامت لایه تعویض شده که به صورت میانگین عمق نفوذ در چند قسمت گزارش می‌شود. C میانگین طول ترک‌ها و χ نیز یک فاکتور بی‌بعد (بیانگر شدت تنش اعمالی) که برابر با $\frac{2}{\sqrt{\pi}}$ (برای تمام شیشه‌های سودالایم) در نظر گرفته شد. ψ فاکتور مربوط به هندسه ترک (ضریب هندسه) می‌باشد که برای تمام شیشه‌ها برابر با ۰/۰۱۶ در نظر گرفته شد. همچنین E برابر با مدول الاستیسیته (برای شیشه سودالایم برابر با ۷۵ گیگاپاسکال)، H نیز برابر با میزان سختی (برای شیشه سودالایم برابر با ۵٫۵ گیگاپاسکال) می‌باشد. علاوه بر این قابل ذکر است در پژوهش لاون، به گونه‌ای در نظر گرفته شد که تنش پسماند در زیر نیم

دایره در سطح شیشه به طور یکنواخت توزیع شده است. توزیع تنش پسماند به صورت یکنواخت در سطح شیشه به صورت تقریبی با عمق نفوذ مرتبط دانسته شد.

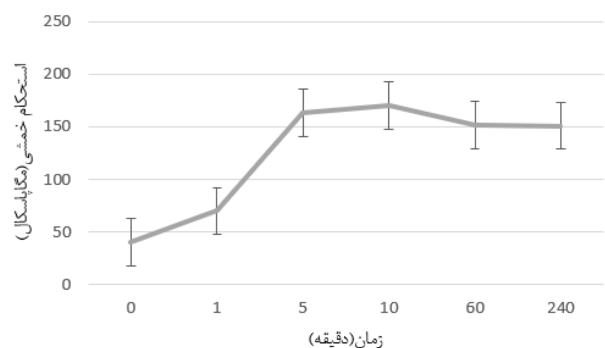
$$\sigma = \frac{3}{4\psi\sqrt{d}}\left(\frac{\chi P}{\sqrt{C^3}} - \psi P\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}} C^{-\frac{3}{2}}\right) [32]$$

در نهایت برای اندازه‌گیری استحکام خمشی از استاندارد ASTM-C-158-95 استفاده شد. در این پژوهش از نمونه شیشه‌ای با ابعاد ۷۵×۲۵×۱ mm استفاده شد و آزمون استحکام سنجی با نرخ اعمال نیرو $1\frac{mm}{min}$، تحت اتمسفر هوا، رطوبت ۳۰-۵۰ درصد و در دمای محیط انجام پذیرفت. همچنین فاصله تکیه‌گاه ۶۳mm قرار داده شد. برای آماده سازی نمونه‌ها ابتدا لبه هر شیشه با سمباده‌هایی از نوع ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰، صیقل داده شد.

نتایج و بحث

استحکام خمشی سه نقطه‌ای

نمونه‌های شیشه‌ای پس از انجام فرآیند تعویض یونی پتاسیم با سدیم، هیچگونه تغییر رنگی را از خود نشان ندادند. پس از انجام فرآیند ابتدا همگی شیشه‌ها تحت آزمون استحکام خمشی ۳ نقطه قرار گرفتند که نتایج آن‌ها بر حسب زمان انجام فرآیند شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ استحکام خمشی نمونه‌های ۲۰۰۰–M– ۴۰۰ (M = مدت زمان انجام آزمایش، ، با مقادیر ۱، ۵، ۱۰، ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه، صفر دقیقه نشانگر نمونه خام است)

شکل (۳) نمودار تغییرات استحکام خمشی بر حسب زمان را برای نمونه‌هایی که تحت شدت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر و دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرارگرفته‌اند، نشان می‌دهد.

با انجام فرآیند تعویض یونی به همراه میدان الکتریکی، استحکام خمشی از ۴۰ مگاپاسکال برای نمونه خام به ۱۷۰ مگاپاسکال برای نمونه ۲۰۰۰–۱۰–۴۰۰ افزایش یافته است. می‌توان مشاهده کرد که هنگامی که نمونه‌ها حتی به مدت ۱ دقیقه تحت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت فرآیند تعویض یونی به همراه میدان قرار می‌گیرند، استحکام خمشی نمونه ۳۰ مگاپاسکال نسبت به نمونه خام افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که بیشینه استحکام خمشی در زمان ۱۰ دقیقه رخ داده است و استحکام خمشی نمونه نسبت به نمونه خام ۱۳۰ مگاپاسکال افزایش داشته است. همانطور که اشاره شد، افزایش استحکام خمشی به علت تنش فشاری پسماند در سطح شیشه است. علت ایجاد تنش فشاری پسماند در سطح، جایگزینی یون کوچک سدیم با یون بزرگتر پتاسیم می‌باشد.

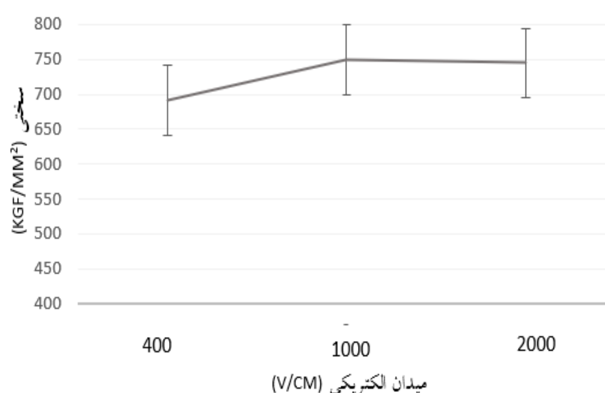
نکته قابل توجه این است که با افزایش زمان فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی از ۱۰ دقیقه به ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه، میزان استحکام خمشی از ۱۷۰ مگاپاسکال به ۱۵۲ و ۱۵۱ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. دلیل کاهش استحکام در زمان‌های طولانی، رهایش تنش فشاری می‌باشد. نتایجی همسو با یافته‌های بدست آمده در این پژوهش توسط وارشنیا وهمکارانش [33,34]، ونگ و همکارانش [35] مبنی بر رهایش تنش به هنگام تعویض یونی ارائه شده است. نقش رهایش تنش در فرآیند تعویض یونی بسیار حائز اهمیت است. چرا که این عامل باعث ناهنجاری‌های پروفایل تنشی در سطح می‌شود. منظور از ناهنجاری‌های تنشی، تغییرات ایجاد شده در شدت تنش سطحی و تغییر مکان ماکزیمم تنش ایجاد شده است. به عبارت دیگر انتظار می‌رود که شدت تنش فشاری پس از فرآیند تعویض یونی در سطح شیشه به ماکزیمم مقدار خود برسد و با حرکت به سمت عمق قطعه از میزان تنش فشاری کاسته شود؛ اما نتایج تجربی نشان دادند که مکان ماکزیمم تنش فشاری در سطح قطعه رخ نمی‌دهد بلکه با فاصله‌ای از آن در عمق قطعه اتفاق می‌افتد [27,34,36]. در مواردی ویسکوزفلو به عنوان عامل رهایش تنش فشاری ایجاد شده در فرآیند تعویض یونی در نظر گرفته می‌شود [37-40] و با افزایش زمان ماند شیشه در دماهای بالاتر این پدیده تشدید می‌شود. بنابراین نمونه‌های ۲۰۰۰–۶۰–۴۰۰ و ۲۰۰۰–۲۴۰–۴۰۰ که در دمای بالا به مدت زمان طولانی (بترتیب ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه)

نگه‌داری می‌شوند؛ احتمال رهایش تنش در آن‌ها تشدید می‌شود. بنابراین افت تنش فشاری در سطح می‌تواند منجر به افت استحکام نمونه‌ها شود. شایان ذکر است که محاسبات تنش فشاری با استفاده از روش فرورونده‌ی ویکرز در بخش (۳-۳) ارائه شده است. این محاسبات مفروضات فوق را تایید می‌کند.

سختی سنجی ویکرز

شکل (۴) نتایج آزمون سختی سنجی را برای نمونه‌های N-۴۰۰-۱۰ که در آن "N" شدت میدان الکتریکی و برابر با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر است، نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های تعویض یونی شده تحت میدان الکتریکی سختی بیشتری از نمونه خام داشتند.

به طور کلی هنگامی که یون بزرگتر (پتاسیم) جایگزین یونی با شعاع یونی کوچکتر (سدیم) در ساختار شیشه می‌شود، حجم مولی سطح افزایش یافته و در نتیجه موجب فشردگی بر روی سطح می‌شود. اما با انجام تعویض یونی و در نتیجه با افزایش شعاع یونی، قطبش بیشتر شده و موجب کاهش مقاومت در برابر فرورونده خارجی می‌شود. پس دو عامل ۱. افزایش تنش فشاری ناشی از تعویض یونی و ۲. افزایش قطبش، با هم در تقابل بوده که اولی موجب افزایش سختی و دومی موجب کاهش سختی می‌شود. در نتیجه تقابل این دو پارامتر تعیین کننده میزان سختی می‌باشد.

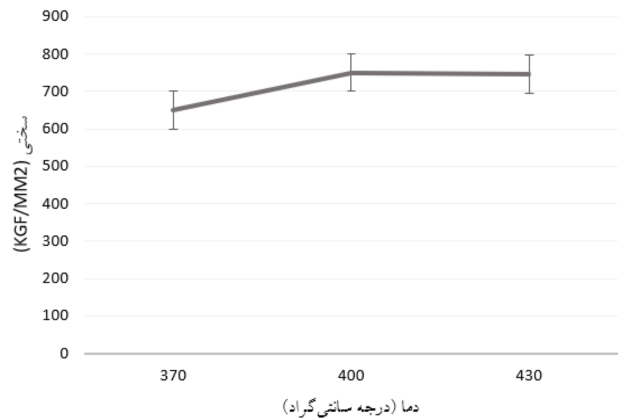


شکل ۳ تاثیر شدت میدان الکتریکی بر عدد سختی در نمونه‌های N-۴۰۰-۱۰ (N = شدت میدان اعمالی، با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر)

شکل (۴) نمودار تغییرات عدد سختی بر حسب شدت میدان را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شدت میدان در دما و زمان ثابت، عدد سختی برای نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر غلظت پتاسیم بر روی سطح با افزایش شدت میدان الکتریکی، بیشتر شده است که موجب افزایش فشردگی سطحی شده و در نتیجه عدد سختی افزایش می‌یابد. همانطور که در

شکل ۳) ملاحظه می‌شود با افزایش میدان از ۴۰۰ ولت بر سانتی‌متر تا ۱۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر در شرایط ثابت، میزان سختی از Kgf/mm^2 ۵۰± ۶۹۲ به Kgf/mm^2 ۵۰± ۷۵۰ افزایش پیدا کرده است. از طرفی با افزایش هرچه بیشتر شدت میدان الکتریکی از V/cm ۱۰۰۰ به V/cm ۲۰۰۰ تغییر چشمگیری در عدد سختی ملاحظه نمی‌شود. علت این امر احتمالا به اشباع شدن سطح از غلظت پتاسیم برمی‌گردد و در نتیجه سختی ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است که منظور از اشباع شدن سطحی تعویض کامل سدیم‌های سطحی با پتاسیم (یون مهاجم) است.

شکل (۵) سختی نمونه‌ها بر حسب دما (۳۷۰، ۴۰۰، ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط زمان و شدت میدان ثابت نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد عدد سختی برابر با kgf/mm^2 ۶۵۰±۵۰ می‌باشد و با افزایش ۳۰ درجه سانتی‌گرادی دما برای نمونه‌ای که در شرایط مشابه تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته است، عدد سختی تا kgf/mm^2 ۷۵۰±۵۰ افزایش می‌یابد. فرآیند تعویض یونی یک فرآیند نفوذی است [27]؛ افزایش دما از ۳۷۰ به ۴۰۰ درجه سانتی گراد موجب افزایش ضریب نفوذ و به تبع آن افزایش غلظت سطحی یون‌های پتاسیم وارد شده می‌گردد. افزایش هر چه بیشتر غلظت سطحی پتاسیم موجب افزایش عدد سختی می‌شود. حال آنکه با افزایش مجدد ۳۰ درجه سانتی‌گرادی دما، در شرایط یکسان، عدد سختی تغییری نمی‌کند، این امر احتمالا به دلیل رسیدن غلظت سطحی پتاسیم به غلظت اشباع می‌باشد و نشانگر آن است که شرایط بهینه برای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی نمونه ۲۰۰۰-۴۰۰-۱۰ است. نتایج نشان داد که نمونه‌های تعویض یونی شده سختی ۲۰ الی ۴۰ درصد بیشتری نسبت نمونه‌های خام دارند.



شکل ۴ تاثیر دما بر عدد سختی نمونه‌های T-۱۰-۲۰۰۰ (T= دمای انجام آزمایش، با مقادیر ۳۷۰، ۴۰۰ و ۴۳۰ درجه سانتی گراد)

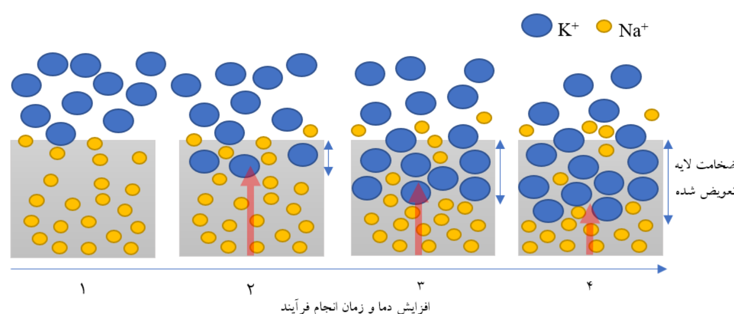
محاسبه تنش پسماند فشاری

جدول (۳)، میزان تنش پسماند محاسبه شده بر حسب زمان را برای نمونه هایی که تحت میدان و دمای یکسان (۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) تعویض یونی شده‌اند نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳) با افزایش زمان فرآیند از ۱ دقیقه به ۵ و۱۰دقیقه در دما و میدان ثابت، تنش پســماند افزایش چشــمگیری داشــته اســت. اما پس از گذشــت ۶۰ دقیقه تنش پسماند به طور واضح کاهش یافته است.

به هنگام افزایش دما و زمان، اگرچه عمق نفوذ پتاسیم افزایش می‌یابد، اما میزان تنش پسماند فشاری در سطح شیشه افت می‌کند. به هنگام انجام فرآیند تعویض یونی، یون‌های کوچک‌تر سدیم از شیشه مادر خارج شده و به جای آنها، یون‌های پتاسیم با شعاع یونی بزرگتر وارد ساختار شیشه می‌شوند. تعویض یون‌های بزرگتر با یون‌های کوچکتر، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح شیشه می‌شود که دلیل این امر، اختلاف شعاع یونی مابین سدیم و پتاسیم می‌باشد. به عبارتی به دلیل وجود عدم تطابق، تنش فشاری از لایه درونی به لایه سطحی اعمال می‌شود (همانند شکل ۵). حال آنکه با افزایش عمق نفوذ یون‌های پتاسیم، غلظت پتاسیم در لایه‌های عمیق‌تر نیز افزایش یافته و میزان اختلاف شعاع یونی(عدم تطابق) میان لایه‌ها (مابین سدیم و پتاسیم) کاهش می‌یابد، در نتیجه با افزایش مدت زمان انجام فرآیند یا دمای فرآیند، عدم تطابق در لایه‌های درونی شیشه کاهش یافته و موجب کاهش تنش پسماند فشاری در سطح شیشه می‌شود. شکل ۵) نحوه ایجاد و رهایش تنش فشاری هنگام افزایش دما یا افزایش زمان را نشان می‌دهد. دایره‌های زرد زنگ نشان دهنده یون سدیم و دایره‌های آبی نشان دهنده یون پتاسیم می‌باشد، همچنین نشانگر قرمز نمایانگر تنش فشاری اعمالی از لایه درونی به لایه سطحی به هنگام تعویض یونی است.

جدول ۳ محاسبه تنش پسماند برای نمونه‌هایی با ضخامت لایه تعویض شده به عمق ۱۰ µm، بار اعمالی فروورنده ۹/۸ N، مدول یانگ شیشه ۷۵ Gpa

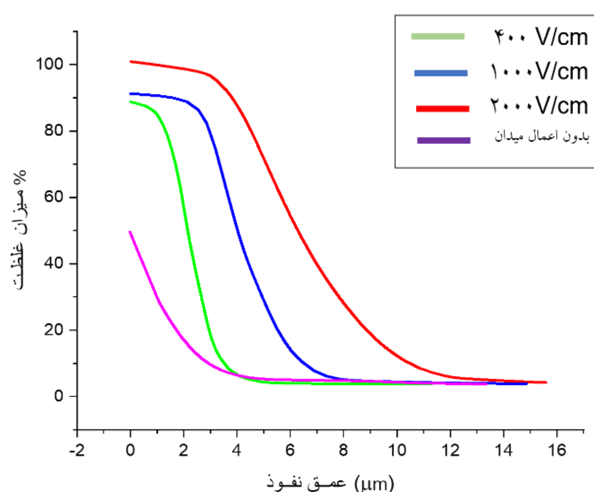
کد نمونه	طول ترک(µm)	سختی (Kgf/mm^2)	تنش پسماند فشاری (Mpa)
۴۰۰-۱-۲۰۰۰	۰,۰۸۷	۵۲۰	۱۵۵,۷۱
۴۰۰-۵-۲۰۰۰	۰,۰۴۷	۵۳۰	۳۸۸,۴۹
۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰	۰,۰۴۷	۵۲۳	۳۹۱,۰۸
۴۰۰-۶۰-۲۰۰۰	۰,۰۵۷	۵۴۱	۲۸۷,۹۲
۴۰۰-۲۴۰-۲۰۰۰	۰,۰۶۲	۵۷۰	۲۴۷,۲۶



شکل ۵ شماتیک نحوه ایجاد و رهایی تنش فشاری در سطح شیشه در اثنای فرآیند تعویض یونی

پروفایل غلظتی

در اثنای فرآیند تعویض یونی به دلیل وجود گرادیان غلظتی و اعمال میدان الکتریکی، یون پتاسیم به داخل ساختار شیشه نفوذ کرده و یک پروفایل پله‌ای شکل ایجاد می‌کند [27,41-43]. شکل (۷) آنالیز خطی طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS-LINE) و پروفایل غلظتی پتاسیم نفوذ کرده در سطح شیشه را نشان می‌دهد. در این آزمون ضخامت شیشه، از سطح تا عمق ۵۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت و غلظت عناصر سیلسیم، اکسیژن، آلومینیوم، پتاسیم، منیزیم و سدیم اندازه گیری شد و با جدول (۱) مقایسه شد.



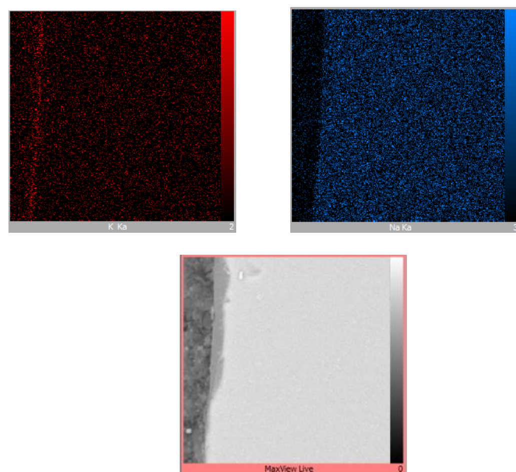
شکل ۶ پروفایل غلظتی عنصر پتاسیم برای نمونه های N–۱۰–۴۰۰ (N = شدت میدان اعمالی، با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر)

همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، با افزایش شدت میدان الکتریکی، عمق نفوذ افزایش یافته است. همچنین با افزایش شدت میدان الکتریکی، غلظت سطحی پتاسیم نیز افزایش یافته است. افزایش شدت میدان الکتریکی، موجب افزایش نیروی لورنس وارد بر ذرات بار دار و در نتیجه افزایش موبیلیته یون‌های نفوذ کننده و در نهایت افزایش عمق نفوذ گردد. نتایج حاصل همسو با نتایج تلیمیان و همکاران [24] است. طبق گزارش ایشان، ضریب نفوذ یون‌ها افزایش یافته که به دلیل تسهیل غلبه بر انرژی اکتیواسیون و در نتیجه جابجایی راحت‌تر یون‌ها می‌شود.

مقایسه تعویض یونی با و بدون میدان الکتریکی صورت پذیرفت. در حالت اول، تعویض یونی با کمک میدان الکتریکی ثابت و در حالت دوم تعویض یونی به روش معمول و بدون میدان الکتریکی انجام شد که نتایج آن در شکل ۶) نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده، میزان عمق نفوذ یون پتاسیم در حالتی که به مدت ۱۰ دقیقه تحت میدان الکتریکی ۴۰۰ ولت بر سانتی‌متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته، با شیشه‌ای که به مدت ۲۴۰ دقیقه و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، درون مذاب نمک قرار گرفته (تمپر شیمیایی) برابری میکند. میزان عمق نفوذ یون پتاسیم در هر دو حالت به ۳ میکرومتری رسیده است. این نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از میدان الکتریکی در فرآیند تعویض یونی می‌توان در مدت زمان بسیار کمتر به عمق نفوذهای بالاتر در مقایسه با تمپر شیمیایی دست یافت. همچنین مشاهده می‌شود که شیشه‌هایی که تحت فرآیند تعویض یونی، به مدت زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با میدان‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر قرار گرفته‌اند، به ترتیب از عمق نفوذ ۷ و ۱۱ میکرومتری برخوردار می‌باشند.

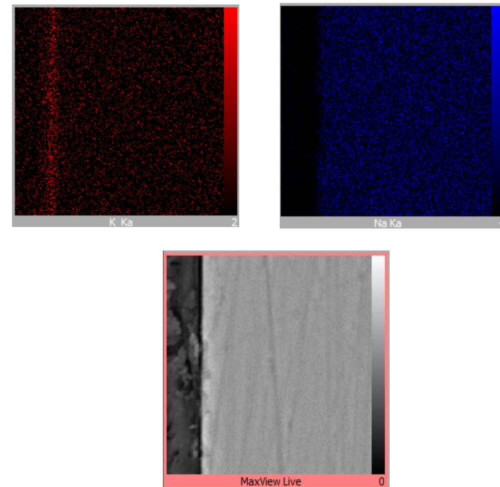
توزیع عناصر پتاسیم و سدیم در شیشه‌های تعویض یونی شده به کمک میدان الکتریکی با شدت میدان‌های ۴۰۰$\frac{v}{cm}$،۱۰۰۰$\frac{v}{cm}$،۲۰۰۰$\frac{v}{cm}$ در راستای سطح مقطع در شکلهای ۸–۱۰ به ترتیب ارائه شده است. تصاویر با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و ولتاژ ۲۰ کیلوولت تهیه شده‌اند.

در شکل (۸) یک لایه متراکم از پتا سیم در سطح شی شه ملاحظه می شود. این لایه‌ی نفوذی می‌تواند ا ستحکام و سختی شیشه را تا حد زیادی بهبود بخشد.



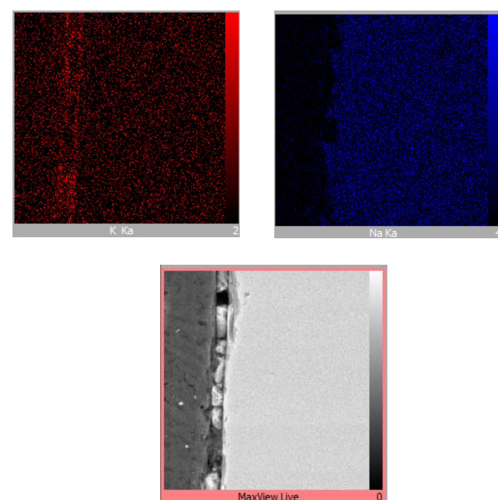
شکل ۷ توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۴۰۰–۱۰–۴۰۰

مطابق شکل (۹) مشاهده می شود که در شرایط یکسان، با افزایش میدان از ۴۰۰ به ۱۰۰۰ ولت بر ســـانتی‌متر عمق نفوذ و همچنین تراکم لایه‌ی پتاسیم در سطح شیشه افزایش یافته است.



شکل ۸ توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۱۰۰۰-۱۰-۴۰۰

همانطور که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود؛ توزیع عناصر سدیم و پتاسیم برای نمونه‌ای که تحت شدت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سـانتی‌متر و در دمای ۴۰۰ درجه سـانتی‌گراد و به مدت زمان ده دقیقه تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته است، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان الکتریکی عمق نفوذ و تراکم عنصر پتاسیم بیشتر شده است.



شکل ۹ توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰

با مقایسه‌ی شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شدت میدان الکتریکی، توزیع سطحی عنصر پتاسیم افزایش یافته و در مقابل توزیع سطحی عنصر سدیم کاسته شده است. به عبارت دیگر با افزایش شدت میدان الکتریکی تبادل یون سدیم و یون پتاسیم بهبود یافته و همچنین غلظت یون پتاسیم در سطح افزایش می‌یابد. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش نیروی لورانس وارده بر ذرات باردار (یون‌ها) شده و موبیلته‌ی آنها را افزایش می‌دهد که این امر موجب افزایش عمق نفوذ و غلظت سطحی برای شدت میدان‌های بالاتر می‌شود.

نتیجه گیری

فرآیند تعویض یونی یا تمپر شیمیایی، یکی از فرآیندهای افزایش استحکام شیشه می‌باشد. به دلیل اینکه این فرآیند به صورت نفوذی انجام می‌شود، انجام این فرآیند به دمای بالا و زمان بسیار زیاد نیازمند است. در صورتی که فرآیند تعویض یونی با میدان الکتریکی همراه شود، زمان مورد نیاز کاهش می‌یابد. در این پژوهش فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی بر روی زیرلایه شیشه‌ی سودالایم صورت پذیرفت. تعویض یون پتاسیم به جای سدیم یک تنش فشاری پسماند در سطح شیشه ایجاد کرد. این تنش فشاری باعث بهبود خواص مکانیکی زیرلایه شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون استحکام خمشی و سختی پس از انجام فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، مشخص شد که استحکام خمشی شیشه‌های زیرلایه از ۴۰ مگاپاسکال برای نمونه خام به ۱۷۰مگاپاسکال برای نمونه ۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰ افزایش یافت. همچنین سختی نمونه‌ی ۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰ به ۵۰±۷۵۰ kgf/mm^2 رسید. بر اساس نتایج آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و اندازه‌گیری پروفایل غلظتی، عمق لایه نفوذ کرده با افزایش میدان الکتریکی، افزایش یافت. این نتایج نشان داد که زیرلایه‌هایی که تحت فرآیند تعویض یونی، به مدت زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با میدان‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر قرار گرفته‌اند، به ترتیب از عمق نفوذ ۷ و ۱۱ میکرومتری برخوردار می‌باشند

در ا ستحکام بخشی شیشه‌های سودالایم، رهایش تنش به عنوان یک فاکتور مهم با ید مد نظر قرار گیرد. ر هایی تنش فشــاری در نمونه‌هایی که به مدت ۶۰ دقیقه و ۲۴۰ دقیقه تحت

فرآیند بودند ملاحظه شـــد. این اثر موجب کاهش اســـتحکام نمونه‌ها از ۱۷۰ مگاپاسکال به ۱۵۱ مگاپاسکال شد.

به هنگام بررسی استحکام خمشی نیز مشاهده شد که با انجام فرآیند تعویض یونی حتی به میزان ۱ دقیقه تحت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام خمشی نسبت به نمونه خام، ۱,۷۵ برابر افزایش یافت. بنابراین استفاده از میدان الکتریکی جهت افزایش راندمان فرآیند و بهبود خواص مکانیکی شیشه‌ی سودالایم حائز اهمیت است.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] K. V. Arun, and C. M. John, “Fundamentals of inorganic glass making,” *Elsevier*, pp. 631-685, 2019. https://doi.org/10.1016/C2017-0-04281-7

[2] J. Spirkova, P. Tresnakova-Nebolova, and M. Mika, "Optical waveguides fabricated by transition element ions exchange in some commercial and special optical glasses," *Optical Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 101-107, 2004. https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00257-X

[3] V. K. Marghussian, Glass, structure, properties and application (In Persian). Iran University of Science & Technology, 2002.

[4] W. H. Zachariasen, "The atomic arrangement in glass," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 54, no. 10, pp. 3841-38511932. https://doi.org/10.1021/ja01349a006

[5] T. Findakly, "Glass waveguides by ion exchange: a review," Optical engineering, vol. 24, no. 2, pp. 244-250, 1985.

[6] A. Tervonen, B. R. West and S. Honkanen, "Ion-exchanged glass waveguide technology: a review," Optical Engineering, vol. 50, no. 7, pp. 071107-071107, 2011.

[7] R. V. Ramaswamy, and R. Srivastava, "Ion-exchanged glass waveguides: a review," *Journal of lightwave technology*, vol. 6, no. 6, pp. 984-1000, 1988. https://doi.org/10.1109/50.4090

[8] H. Yoshida, and T. Kataoka, “Migration of two ions during electrolysis of glass waveguide,” *Journal of applied physics*, vol. 58, no. 5, pp. 1739-1743, 1985. https://doi.org/10.1063/1.336022

[9] E. Cattaruzza, V. M. Caselli, M. Mardegan, F. Gonella, G. Bottaro, A. Quaranta, G. Valotto, and F. Enrichi, "Ag+↔ Na+ ion exchanged silicate glasses for solar cells covering: down-shifting properties," *Ceramics International*, vol. 41, no. 5, pp. 7221-7226, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.060

[10] J. E. Broquin, and S. Honkanen, "Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, pp. 4472, 2021. https://doi.org/10.3390/app11104472

[11] J. Kosikova, "Optical waveguides prepared by ion exchange technique," *Photonics Devices* and *Systems II*, vol. 5036: SPIE, pp. 315-32, 2003. https://doi.org/10.1117/12.498528

[12] L. Wang, J. Feng, K. Lei, X. Zhao, X. Ma, D. Wu, and Y. He, "The effect of substrate thickness on the fluorescence of single-doped Cu+ glass prepared by ion exchange," *Ceramics Internationa*, vol. 50, no. 9 (Part: B), pp. 15375-15388, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.140

[13] M. Lallukka, M. Miola, Z. Najmi, A. Cochis, S. Spriano, L. Rimondini, and E. Verné, "Cu-doped bioactive glass with enhanced in vitro bioactivity and antibacterial properties," *Ceramics International,* vol. 50, no. 3, (Part: B), pp. 5091-5103, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.253

[14] F. Teng, J. Yuan, P. Tian, Q. Zhang, X. Du, Ch. Li, and W. Wang, "Study on the ion-exchange copper-loaded antibacterial glasses," *Ceramics International,* vol. 48, no. 22, pp. 32798-32803, 2022. http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.205

[15] D. Guldiren, and S. Aydın, "Antimicrobial property of silver, silver-zinc and silver-copper incorporated soda lime glass prepared by ion exchange," *Materials Science and Engineering: C,* vol. 78, pp. 826-832, 2017. https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.134

[16] X. Jiang, C. Li, X. Lin, Z. Zhou, Y. Luo, A. Lu, and Zh. Bai, "Study on the silver-copper containing chemically strengthened antimicrobial glass prepared by ion-exchange," *Ceramics International,* vol. 50, no. 9, (Part: B), pp. 15490-15501, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.027

[17] W. Wang, R. Guo, C. Niu, Z. Zhao, and K. Xu, "Diffusion and release behavior of Ag+ in ion-exchanged antibacterial glaze," *International Journal of Applied Ceramic Technology,* 2024. https://doi.org/10.1111/ijac.14663

[18] O. Banapour Ghaffari, B. Eftekhari Yekta, and M. Zakeri-Nasrabadi, "Estimating “depth of layer” (DOL) in ion-exchanged glasses using explainable machine learning," *Materialia*, vol. 33, pp. 102027, 2024. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102027

[19] K. A. Kirchner, and J. C. Mauro, "Entropy production during ion exchange of glass," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, no. 2, pp. 880-896, 2024. https://doi.org/10.1111/jace.19534

[20] B. Eftekhari Yekta, and O. Banapour Ghafari, “Electrical Conductivity in the Molten and Glassy States of the Li2(O, Cl2, I2)-B2O3 system,” *IUST*, vol. 20, no. 4, pp. 1-9, 2023. DOI: 10.22068/ijmse.3300

[21]R. F. Asfaw, and V. M. Sglavo, " Chemical Tempering of Soda Lime Silicate Glass by Electric Field Assisted Techniques, pp. 509-521, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50349-8_43

[22] S. Karlsson, B. Jonson, and C. Stålhandske, "The technology of chemical glass strengthening-a review," *Glass Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 41-54, (2010).

[23] A. K. Varshneya, "The physics of chemical strengthening of glass: room for a new view," *Journal of non-crystalline solids,* vol. 356, no. 44-49, pp. 2289-2294, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.05.010

[24] A. Talimian, G. Mariotto, and V. M. Sglavo, "Electric field-assisted ion exchange strengthening of borosilicate and soda lime silicate glass," International Journal of Applied Glass Science, vol. 8, no. 3, pp. 291-300, 2017. https://doi.org/10.1111/ijag.12266

[25] G. Pintori, and V. M. Sglavo, "Electric-field assisted ion-exchange of innovative float glass," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 600, pp. 121994, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121994

[26] D. Kapila, and J. Plawsky, "Diffusion processes for integrated waveguide fabrication in glasses: a solid-state electrochemical approach," *Chemical Engineering Science,* vol. 50, no. 16, pp. 2589-2600, 1995. https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00115-L

[27] J. C. Mauro, “Materials Kinetics: Transport and Rate Phenomena,” Elsevier, First Edition, 2020.

[28] İ. Erdem, D. Guldiren, and S. Aydin, "Chemical tempering of soda lime silicate glasses by ion exchange process for the improvement of surface and bulk mechanical strength," *Journal of Non-Crystalline Solids,* vol. 473, pp. 170-178, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.08.010

[29] V. M. Sglavo, "Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO 3 bath," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 6, no. 1, pp. 72-82, 2015. https://doi.org/10.1111/ijag.12101

[30] G. Macrelli, A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, " Thermal treatment of ion-exchanged glass," *International Journal of Applied Glass Science,* vol. 14, no. 1, pp. 7-17, 2023. https://doi.org/10.1111/ijag.16590

[31] A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, "Fundamentals of inorganic glasses," Third Edition, 2019.

[32] B. R. Lawn, and E. R. Fuller, " Measurement of thin-layer surface stresses by indentation fracture," *Journal of Materials Science*, vol. 19, pp. 4061-4067, 1984. https://doi.org/10.1007/BF00980772

[32] A. K. Varshneya, "Chemically strengthened lithium aluminosilicate glass having high strength effective to resist fracture upon flexing," ed: Google Patents, 2012.

[34] A. K. Varshneya, G. A. Olson, P. K. Kreski, and P. K. Gupta, "Buildup and relaxation of stress in chemically strengthened glass," *Journal of Non-Crystalline Solids,* vol. 427, pp. 91-97, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.07.037

[35] M. Wang, M. M. Smedskjaer, J. C. Mauro, G. Sant, and M. Bauchy, "Topological origin of the network dilation anomaly in ion-exchanged glasses," *Physical Review Applied*, vol. 8, no. 5, pp. 054040, 2017. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.054040

[36] G. Macrelli, A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, "Simulation of glass network evolution during chemical strengthening: Resolution of the subsurface compression maximum anomaly," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 522, p. 119457, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.05.033

[37] O. V. Mazurin, B. B. Petroff, S. V. Todorova, A. I. Priven, J. W. P. Schmelzer, and I. S. Gutzow , "Glasses and the glass transition," John Wiley & Sons, 2011.

[38] J. Shen, D. J. Green, R. E. Tressler, and D. L. Shelleman, "Stress relaxation of a soda lime silicate glass below the glass transition temperature," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 324, no. 3, pp. 277-288, 2003. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00260-6

[39] J. Seaman, P. Lezzi, T. Blanchet, and M. Tomozawa, " Degradation of ion-exchange strengthened glasses due to surface stress relaxation," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 403, pp. 113-123, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.07.016

[40] A. K. Varshneya, "Mechanical model to simulate buildup and relaxation of stress during glass chemical strengthening," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 433, pp. 28-30, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.11.006

[41] A. Talimian, G. Mariotto, and V. M. Sglavo, "Electric field assisted ion exchange strengthening of borosilicate and soda lime silicate glass," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 8, no. 3, pp. 291-300, 2017. https://doi.org/10.1111/ijag.12266

[42] A. Talimian, and V. M. Sglavo, "Electric Field-Assisted Ion Exchange of Borosilicate Glass Tubes," *Ion Exchange-Studies and Applications:* IntechOpen, 2015.

[43] N. Takamure, A. Kondyurin, and D. R. McKenzie, "Electric field assisted ion exchange of silver in soda-lime glass: a study of ion depletion layers and interactions with potassium," *Journal of Applied Physics*, vol. 125, no. 17, 2019. https://doi.org/10.1063/1.5092545